



# **Depositional Setting and Stratigraphic Patterns of Pre-Salt Carbonates in a sector of the Santos Basin, Brazil**

Bruno Filipe Félix Carvalho

**Mestrado em Geologia**

Especialização em Estratigrafia, Sedimentologia e Paleontologia

Versão Pública

Dissertação orientada por:

Prof. Doutora Ana Cristina Azerêdo e Doutor Marco Ferraz

*“The absence of evidence does not always implies the evidence of absence”*

Carl Sagan

## Acknowledgments

I would like to thank my advisor Professor Doctor Ana Cristina Azerêdo for all the teachings during the progress of this work. The patience and availability to revisit the basis of core and thin sections descriptions and carbonate geology were fundamental for the development of this study, as well as the prompt support and enthusiasm demonstrated during the progress of the work. It was an honor to learn from someone with her experience in carbonate geology and diagenetic processes, always contributing with valid observations that leads to a more rigorous approach to this work.

I would also like to thank to my advisor Marco Ferraz for all the guidance during the entire process. I have no words to describe how grateful I am for all the teachings, all the fruitful discussions and all the mentoring, on a daily basis, giving a significant contribution for the scientific rigor and clarity of this manuscript. His experience in the oil and gas industry as well as in *academia* and his geological background in sedimentology and stratigraphy were a key factor in order to endorse the path of this work, so it would be used in the industry, without disregard the academic part. All the enthusiasm, support and dedication to this work, as well as the constant revision and corrections/suggestions regarding this manuscript contributed to push me further and to improve and reach higher standards, and were much appreciated. It was a privilege to work with a professional like him, who trusted and believed in my work since the beginning and always found time in his busy agenda, even when that implied to take it from his personal live, to provide constructive feedback, which helped me to grow both personally and professionally.

I would like to express my acknowledgements to the consortium Petrobras/Petrogal/Partex and Lisbon University for the post graduate studies in the Petroleum Geology related subjects scholarship.

Likewise, I express my thanks to Faculty of Science from Lisbon University for accepting me as an MSc student, and to Geology Department for allowing me developing the work using its facilities, when necessary.

I want to express my gratitude to my employer, Galp Energia S.A., represented by the person of the Exploration Manager Roland Muggli, for the possibility of such work, allowing me to use company's data and industry resources in the development of this study.

To my supervisor, Gonzalo Peñaloza, I strongly thank for the support and interest since the day I presented the idea of doing a master graduation, and for always believe that the results of this work would provide significant inputs for the comprehension of Brazilian Pre-Salt carbonates. I am also grateful to him for allowing me to dedicate part of my working time to the development of this thesis.

I would also like to thank to Tomás Moura, who dedicated a lot of time to make sure that the confidential agreement between Galp and FCUL was achieved in time, and to make the proper arrangements to assure the validation of this agreement from Galp board side. Likewise, I would like to thank to Fernando Lopes, from FCUL, for all the time dedicated on this agreement and for assuring the validation from FCUL director side.

In order to perform the detailed core description, it was necessary to visit Petrobras core description laboratory in CENPES (Rio de Janeiro, Brazil). For this, I thank Petrobras for allowing the access to their facilities, and to the CENPES employees, which were always available to support in any of our needs.

The detailed core description is a complex and time consuming assignment, where is tried to capture all the tiny details observed in samples and thin sections. For that reason, it was impossible to perform the description of 6 wells in two weeks all by myself, and I want to express my gratitude to the core description team who accompanied me along this process.

To Maria Olho Azul Martins, I strongly thank her for the support and enthusiasm on making the proper arrangements for our visit to CENPES, and to be available almost every day to teach, discuss and work with us *in situ* in this core description process. Thanks to her experience, it was possible to describe all the accessible samples in the time we had available.

To Rui Miranda, my acknowledgement for promptly accept being part of this process and travel with me to Rio de Janeiro, and for all the dedication and productive discussions during those two weeks. Also, his valuable help on the data integration process, started in Brazil, after entire days describing core, and finished back in Lisbon office, is much appreciated, as it allowed to save important time for the following tasks.

My thanks to Daniel Marques da Silva, Natalia Hoska and Pricilla Souza for the availability, support and time spent on core description process, even when the conditions we had were not the most favorable to do it.

To my colleagues in the Development Geology Group, I want to express my deep gratitude for all the encouragement and discussions during this process, and for providing me with data from previous projects (namely the main seismic horizons interpretation and the structural grid), which were essentials to reach the obtained results in this work. From the group, I would like to specially thank to Catarina Araújo, for all the support and advices regarding ArcGIS®, contributing for a better display of the data in maps, and to Gonçalo Matos, for all the patience and support during the facies model process, providing useful inputs and feedback that enhanced the final model. To both, I thank all the lunch times and breaks conversations and discussions, and for all your support since the beginning of this work.

To my family and friends, I thank for all the love and support during this process, especially in the final months, and for (almost) always understood my absences in lunches, dinners and parties, and for the successive days without receiving a single call from my side, while I was home (or still at office) working for this thesis.

As the typical portuguese saying goes, the last is always the first, finally to Sara. I cannot thank enough for all the care and support since day one, when I decided to embark in this journey. I thank for all the comprehension and patience during the development of this work, especially in the less good days, and for sometimes abdicate of our plans, so I could focus in writing this thesis.

## **Abstract**

This work aims to better understand the Pre-Salt Barra-Velha Formation lacustrine carbonates and their depositional setting and diagenetic evolution in a specific zone of Santos Basin, Brazil. A multi-scale workflow based on well core analysis and its relation with well log data and stratigraphic seismic interpretation was used to provide a better understanding of facies distribution and depositional cycles, with focus on the Upper Sag unit. The outcomes from the different tasks allowed to develop a conceptual depositional model with application on reservoir characterization, representing a generic regional propose applicable to the Pre-Salt carbonates in the studied area.

The results from the six described wells demonstrate high depositional cyclicity, indicating mainly a shallow water environment, being possible to define a generic facies sequence based on base-level position and energy variations. Facies successions identification allowed the recognition of sequence boundaries, which demonstrated that changes in base-level and accommodation space were responsible for different facies deposition. The integration of multiscale data with seismic interpretation demonstrate a progressive basin fill, starting north and gradually reaching structural higher positions. Paleogeomorphology strongly controlled sediment deposition, as different depositional environment conditions were observed in different structural positions, with high base-level position and low energy facies being mainly recognized in structural lows and low base-level position and high energy facies being mostly identified in structural highs. It was also recognized an affinity of diagenetic processes with paleogeomorphology, with fluid circulation having a major impact in structural low positions resulting in porosity reduction processes, while in structural high positions, porosity generation or enhancing processes tend to be more frequent.

The understanding of depositional environments retrieved from this study will enhance the geological understanding of Santos Basin depositional setting and may assist on hydrocarbon exploration by providing a more robust reservoir characterization, from a geological point of view.

**Key-words:** Pre-Salt carbonates, facies, base-level variation, paleogeomorphology, depositional environment.

## Resumo

A área de estudo, localizada na Bacia de Santos, Brasil, é caracterizada por um bom desenvolvimento dos carbonatos da Formação Barra-Velha, dos quais a configuração geológica ainda não é completamente compreendida.

A bacia de Santos data da idade hauteriviana, quando ocorreu a abertura do Oceano Atlântico Sul (*break-up* do Gondwana), sendo preenchida por depósitos de Rifte (*shales* e coquinas) e posteriormente por depósitos aptianos do *Sag* (carbonatos), sobrepostos por uma camada espessa de sal. Os carbonatos do *Sag* são o principal reservatório da Bacia de Santos e são geralmente interpretados como carbonatos lacustres. Este tipo de depósitos formam-se nos mais variados ambientes tectônicos e são normalmente controlados por variações climáticas, causando uma heterogeneidade considerável nestes depósitos.

A investigação de carbonatos não marinhos, especialmente em termos de desenvolvimento de conceitos e modelos deposicionais aplicáveis está ainda numa fase precoce. A origem dos carbonatos do Pré-Sal brasileiro encontra-se ainda sob escrutínio na comunidade científica, sendo a natureza biótica ou abiótica deste tipo de depósitos o foco principal de discussão.

A definição de configurações deposicionais e a caracterização estratigráfica são enriquecidas através da descrição de amostras e classificação de fácies, usando como suporte diferentes métodos de classificação. No entanto, tendo em consideração as complexas fácies carbonatadas da bacia de Santos, a definição de uma classificação genérica é uma tarefa árdua, sendo que a solução passa por uma adaptação das classificações existentes para uma realidade regional, de acordo com os problemas específicos em estudo.

Este trabalho pretende contribuir para um melhor entendimento dos carbonatos do Pré-Sal da Formação Barra-Velha e a sua configuração deposicional e evolução diagenética para a área em estudo. Para o efeito, um fluxo de trabalho com integração de dados de diferentes escalas foi utilizado, baseado na análise de testemunhos de poço, dados petrofísicos e interpretação sísmica, fornecendo uma melhor compreensão da distribuição de fácies e ciclos deposicionais, com foco na unidade do Upper *Sag*.

A descrição detalhada de testemunhos, amostras laterais e lâminas delgadas permitiu confirmar que a classificação de fácies adotada para este estudo é apropriada para classificar carbonatos do Pré-Sal. Esta tarefa permitiu obter informação relevante referente às amostras descritas, tais como o carácter estratigráfico do reservatório, condições de porosidade e permeabilidade, evidências estruturais, entre outras informações pertinentes.

Uma análise geostatística foi realizada para fácies, processos diagenéticos e tipos de poros. Esta tarefa permitiu inferir sobre a relação entre as características analisadas e estabelecer tendências de distribuição espacial.

A identificação de limites de sequências estratigráficas permitiram reconhecer as variações do nível de base do lago e caracterizar condições ambientais, realçando o espaço de acomodação aquando a deposição, de acordo com a posição do nível de base sustentado pela sucessão de fácies.

A propagação espacial de fácies permitiu definir tendências estratigráficas e criar corpos geológicos para cada fácies. Esta propagação foi realizada com recurso a um programa de modelação, aplicando os devidos algoritmos de forma a respeitar o significado geológico e os conceitos teóricos, e de acordo com as tendências geológicas identificadas.

Considerando os resultados das diferentes tarefas ao longo deste trabalho, um modelo deposicional final foi construído, refletindo a relação estratigráfica de cada fácies considerada com o seu ambiente de deposição através da identificação de limites de sequências estratigráficas. Este modelo representa uma proposta regional e genérica, aplicável aos carbonatos do Pré-Sal na área em estudo.

Os resultados provenientes da descrição dos seis poços analisados demonstram uma alta ciclicidade deposicional, justificada pela recorrente variação de fácies e pela sua (em geral) pequena espessura, indicando predominantemente um ambiente de água pouco profunda. Pequenas variações no nível de base do lago e, conseqüentemente, no espaço de acomodação terão sido suficientes para gerar fácies deposicionais distintas. Foi também possível identificar uma sequência deposicional de fácies, baseada nas variações de nível de base e de energia.

A identificação de limites de sequências estratigráficas permitiu verificar variações estratigráficas de terceira e quarta ordem, indicando que alterações no nível de base do lago e no espaço de acomodação desencadearam a deposição de diferentes fácies, sendo também provável que o quimismo da água tenha um papel importante nesta dinâmica.

A análise regional dos dados demonstra um preenchimento gradual da bacia, tendo início na zona norte, com o preenchimento sucessivo da zona noroeste e posteriormente da zona sul, progressivamente alcançando as zonas estruturalmente mais altas. Este sentido de enchimento da bacia é fundamentado pela identificação de um número diferente de episódios de variação de nível de base do lago na área de estudo, sendo que foram identificados mais episódios no norte, com o número de episódios verificados progressivamente menor em posições estruturalmente mais altas.

Zonas de alto estrutural com um elevado declive evidenciam um provável regime hidrodinâmico de alta energia em certas fases de deposição, o que terá provocado o retrabalhamento de material previamente depositado, gerando-se fácies do tipo *grainstone*, relativamente contínuas no registro geológico nesta zona. Em zonas de declive menos acentuado, é mais recorrente verificar-se sucessivas variações de fácies. Estas observações demonstram um forte controle da paleogeomorfologia sobre a configuração deposicional e a distribuição vertical e espacial de fácies, uma vez que fácies de baixa energia e elevada posição do nível de base se encontram em zonas estruturais mais baixas, enquanto fácies de maior energia e baixa posição de nível de base se encontram em zonas estruturalmente mais altas.

Verificou-se que o conceito de deposição evaporítica pode ser aplicado em áreas específicas da região de estudo, em depocentros confinados e em fases preliminares de deposição. Esta situação resultou numa paleogeomorfologia em que diferentes condições de acomodação podem ter controlado a deposição de sedimentos, e fácies conseqüentes, num ponto de vista de preenchimento progressivo da bacia.

Os processos diagenéticos na área em estudo são complexos, e podem ocorrer de forma diferente na mesma fácies e/ou em diferentes momentos no tempo. No entanto, foi possível definir uma sequência paragenética que representa de uma forma genérica a sucessão de eventos nas amostras estudadas. Foi também reconhecida uma afinidade de processos diagenéticos com a paleogeomorfologia, uma vez que a circulação de fluidos terá tido um maior impacto em posições estruturalmente mais baixas, possivelmente devido à presença de falhas que funcionaram como corredores de circulação, resultando em processos de redução de porosidade. Pelo contrário, em posições estruturalmente mais altas, processos de geração ou melhoramento de porosidade tendem a ser mais frequentes. No que diz respeito aos tipos de poros, a sua distribuição espacial e vertical demonstra uma elevada heterogeneidade na área de estudo, sendo que a sua ocorrência será maioritariamente controlada por processos diagenéticos ao invés da configuração estrutural. No entanto, é possível encontrar relações entre tipos de poros e fácies, se considerarmos tipos de poros primários, isto é, gerados no desenvolvimento das facies deposicionais.

Os resultados atingidos neste trabalho demonstram que a integração de dados de diferentes escalas (descrição detalhada de testemunhos e lâminas delgadas, diagrfias, interpretação sísmica) é uma abordagem válida para fornecer uma caracterização sedimentológica e estratigráfica de reservatório para os carbonatos do Pré-Sal brasileiro. Embora não seja possível fazer uma ligação direta entre as condições de

reservatório apenas com base na distribuição de fácies, a compreensão de condições ambientais locais permitem inferir se existe a possibilidade de se desenvolverem depósitos com boas condições de reservatório, auxiliando no processo de exploração e produção de hidrocarbonetos bem como na tomada de decisões estratégicas referentes a planos de desenvolvimento de campos petrolíferos.

**Palavras-chave:** Carbonatos do Pré-Sal, fácies, variações de nível de base, paleogeomorfologia, ambiente deposicional.



## Table of Contents

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Purpose and aims .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Proposed tasks and workflow.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Regional and geological background.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Carbonate sedimentology background.....</b>	<b>8</b>
1.4.1. Carbonate morphology .....	8
1.4.2. Carbonate sequence stratigraphy .....	9
1.4.3. Lacustrine carbonates.....	11
1.4.3.1. Lake tectonics.....	11
1.4.3.2. Lake classification.....	11
1.4.3.3. Carbonate sedimentation in lakes .....	12
1.4.4. Diagenetic processes .....	13
<b>2. Methods.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Core data description.....</b>	<b>16</b>
2.1.1. Carbonate classification .....	18
2.1.2. Facies classification .....	20
2.1.3. Diagenesis.....	21
2.1.4. Pore types .....	21
2.1.5. Geostatistical analysis .....	21
<b>2.2. Data Integration .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Well Correlation.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4. Stratigraphic Interpretation and Sequence Boundaries.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5. 3D Facies Distribution .....</b>	<b>26</b>
<b>2.6. Depositional Model.....</b>	<b>29</b>
<b>3. Facies and diagenesis background.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Facies .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2. Diagenesis and pore types.....</b>	<b>35</b>
<b>4. Results and discussion.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1. Well results .....</b>	<b>37</b>
4.1.1. Well BO1.....	37
4.1.2. Well BO2.....	39
4.1.3. Well BO3.....	41
4.1.4. Well BO4.....	43

---

4.1.5.	Well BO5.....	45
4.1.6.	Well BO6.....	47
<b>4.2.</b>	<b>Geostatistical analysis .....</b>	<b>50</b>
4.2.1.	Facies.....	50
4.2.2.	Diagenetic Overprints.....	52
4.2.3.	Pore types .....	54
<b>4.3.</b>	<b>Well Correlation.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.</b>	<b>Stratigraphic Interpretation and Sequence Boundaries.....</b>	<b>61</b>
<b>4.5.</b>	<b>Facies Spatial Distribution and Depositional model .....</b>	<b>69</b>
4.5.1.	Facies propagation .....	69
4.5.2.	Facies distribution analysis .....	72
4.5.3.	Sedimentary evolution.....	74
<b>5.</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>77</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliography .....</b>	<b>79</b>